

## 明 細 書

## ロッド型固体レーザー装置

## 技術分野

- [0001] この発明は、ロッド型の固体レーザー媒質を光励起しレーザー光を発生させるとともに、該レーザー光を光ファイバへ入射させ、レーザー光の伝送を行うロッド型固体レーザー装置に関する。

## 背景技術

- [0002] 従来のロッド型固体レーザー装置においては、レーザービームの光軸上にビーム径を制限する開口を設け、該開口を光ファイバの入射端面に転写する構成としていた(例えば、特許文献1、特許文献2参照)。
- [0003] 特許文献1:特開2003-78190号公報(第0022~0025段落、第1図)  
特許文献2:特開2003-209307号公報(第0019段落、第1図)

## 発明の開示

## 発明が解決しようとする課題

- [0004] 光ファイバを使用しレーザー光の伝送を行う従来のロッド型固体レーザー装置においては、レーザー出力に応じてロッド型レーザー媒質の熱レンズの強さ(焦点距離)が変化するため、レーザー光を取り出すために設けられた光共振器中で選択される固有モードが変化し、光ファイバへ入射するレーザー光の集束角もレーザー出力に応じて変化していた。ステップ屈折率型の光ファイバを使用する場合、光ファイバ内部でレーザー光の集束角は概ね保存されるため、光ファイバを出射するレーザー光の発散角も、集束角に対応してレーザー出力によって変化する。ここで、光ファイバへ入射するレーザー光の集束角および、光ファイバから出射するレーザー光の発散角は、図15における $\alpha$ の角度を示す。光ファイバを出射するレーザー光は、ビームウェスト径が光ファイバのコア径と略等しく見なすことができるため、発散角の変化は集光性の変化に等しい。従って、従来のロッド型固体レーザー装置では、光ファイバから出射されるレーザー光の集光性は、レーザー出力によって変化していた。
- [0005] 上述のように、従来のロッド型固体レーザー装置においては、レーザー出力によって光

ファイバを出射するレーザ光の発散角、即ち集光性が変化するため、例えば、光ファイバの出射端を集光光学系からなる加工ヘッドに結合し、レーザ光を利用する場合、加工ヘッドを通過するレーザ光の透過率が、レーザ出力によって変化するという問題点があった。また集光光学系へ入射するレーザ光のビーム径も、レーザ出力によって変化するため、集光光学系における収差の影響がレーザ出力によって異なり、集光ビーム径もレーザ出力によって変化してしまうという問題点があった。

[0006] また従来のロッド型固体レーザ装置においては、レーザ光のポインティング変動の影響を防止する手段が備えられていなかったため、レーザ光のポインティング変動が発生した場合、光ファイバへのレーザ光の集束角が変化し、光ファイバを出射するレーザ光の発散角が更に増加、集光性が低下するという問題点があった。加えて、ポインティング変動の発生によって、光ファイバへのレーザ光の集束角が、光ファイバの許容NAを超える場合には、光ファイバからレーザ光が漏洩し、光ファイバの両端部を支持するコネクタや、光ファイバを被服する保護層を加熱し、損傷に至らしめるという問題点があった。

[0007] この発明は、かかる問題点を解決するためになされたものであり、ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズの強さが変化した場合であっても、光ファイバへ入射するレーザ光の集束角を略一定に保ち、またレーザ光のビームポインティングが変動した場合であっても光ファイバの損傷を防止し、安定にレーザ光を供給することが可能なロッド型固体レーザ装置を提供することを目的としている。

#### 課題を解決するための手段

[0008] この発明に係るロッド型固体レーザ装置においては、ロッド型固体レーザ媒質と部分反射鏡及び全反射鏡からなる対称安定型光共振器から出力されたレーザ光を、リレーレンズと結合レンズを用いて光ファイバへ入射するロッド型固体レーザ装置において、前記部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザ媒質の前記部分反射鏡に対向する端面と、このロッド型固体レーザ媒質の midpoint との間の任意の位置に第1の基準面を設定し、該第1の基準面と、前記部分反射鏡に対し光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、前記リレーレンズは、前記第1の基準面を第1像面に転写するとともに前記第2の基準面を前記結合レンズ上に転写する位置に配置され

、前記結合レンズは、前記第1像面を光ファイバ端面に転写する位置に配置されたものである。

### 発明の効果

- [0009] この発明は上述のごとく構成されているので、ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズの焦点距離が変動した場合であっても、結合レンズ、ならびに光ファイバ入射端面上におけるビーム径、ビーム位置を略一定に維持し、安定かつ信頼性に優れた光ファイバによるビーム伝送が可能になるばかりでなく、光ファイバを出射するレーザ光の集光性も略一定に保つことができる。

### 図面の簡単な説明

- [0010] [図1]この発明の実施の形態1におけるロッド型固体レーザ装置の構成を示す模式図である。
- [図2]この発明の実施の形態1におけるロッド型固体レーザ媒質を示す模式図である。
- [図3]この発明の実施の形態1におけるロッド型固体レーザ媒質に、平面鏡からなる部分反射鏡、および全反射鏡を配して構成した対称安定型光共振器を示す構成図である。
- [図4]この発明の実施の形態1における対称安定型光共振器を、2つの等価熱レンズを用いて表した光学的に等価な対称安定型光共振器を示す構成図である。
- [図5]この発明の実施の形態1における対称安定型光共振器を、単一の等価熱レンズを用いて表した光学的に等価な対称安定型光共振器を示す構成図である。
- [図6]この発明の実施の形態1における対称安定型光共振器中におけるレーザ光のモード形状、即ちビーム伝播状態を示す説明図である。
- [図7]この発明の実施の形態1における対称安定型光共振器を、単一の等価熱レンズを用いて表した光学的に等価な対称安定型光共振器中におけるレーザ光のモード形状、即ちビーム伝播状態を示す説明図である。
- [図8]この発明の実施の形態1に基づき設計した光学系中における、ビーム伝播状況を示すグラフである。
- [図9]この発明の実施の形態1における、レーザ出力に対する光ファイバ入射時のビ

ーム集束角を示すグラフである。

[図10]この発明の実施の形態2におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。

[図11]この発明の実施の形態3におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。

[図12]この発明の実施の形態4におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。

[図13]この発明の実施の形態5におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。

[図14]この発明の実施の形態6におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。

[図15]光ファイバに入射するレーザー光の集束角を説明する図である。

発明を実施するための最良の形態

[0011] 実施の形態1.

図1はこの発明の実施の形態1におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。図1において、1はロッド型固体レーザー媒質、101はロッド型固体レーザー媒質1の中心、102はロッド型固体レーザー媒質1の端面を表している。本実施の形態において固体レーザー媒質1には、活性媒質としてNd(ネオジウム)がドープされたYAG(イットリウムアルミニウムガーネット)結晶を使用している。2は部分反射鏡、3は全反射鏡、4はレーザー光である。部分反射鏡2、および全反射鏡3により光共振器を構成し、ランプ光源や半導体レーザーを用いて光励起されたロッド型固体レーザー媒質1よりレーザー光を取り出す。5はレーザー光4の光路上に設置されたアパーチャで、ロッド型固体レーザー媒質1の直径と略等しい開口径を有する。6は焦点距離 $f_1$ を有するリレーレンズ、7は焦点距離 $f_2$ を有する結合レンズである。8は光ファイバ、81は光ファイバの入射端面を示している。アパーチャ5を通過したレーザー光4は、リレーレンズ6によって結合レンズ7へ伝送される。結合レンズ7へ伝送されたレーザー光4は、結合レンズ7によって集光され、光ファイバの入射端面81より光ファイバ8中へ入射する。点線で示す9は、励起されたロッド型固体レーザー媒質1において、中心101より部分反射鏡2側

に位置する領域の熱レンズ成分と、光学的に等価な薄肉レンズを表す等価熱レンズ、10は後述する第1転写光学系の第1像面を表している。

[0012] 本実施の形態においては、平面鏡からなる部分反射鏡2、および全反射鏡3を使用し、それぞれロッド型固体レーザ媒質1の端面から $L_m$ なる位置に部分反射鏡2、全反射鏡3を配すことによって、対称安定型共振器を構成している。従って、ロッド型固体レーザ媒質1が理想的に均一に励起されている場合、光共振器中でのビームモードは、ロッド型固体レーザ媒質1の midpoint 101 に対し対称性が保証される。

[0013] また本実施の形態においては、部分反射鏡2より距離 $L_1$ なる位置に、ロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を、アパーチャ5より距離 $L_2$ なる位置に、焦点距離 $f_1$ を有するリレーレンズ6を、リレーレンズ6より距離 $L_3 + L_4$ なる位置に、焦点距離 $f_2$ を有する結合レンズ7を、結合レンズ7より距離 $L_5$ なる位置に、光ファイバ8の入射端面81を配置している。また等価熱レンズ9の主面位置は、ロッド型固体レーザ媒質1の端面102より $L_{tl}$ なる距離に位置している。

[0014] 本実施の形態において、リレーレンズ6、および結合レンズ7は第1転写光学系を構成しており、まず等価熱レンズ9の主面を、リレーレンズ6によって第1像面10上に転写する。更に第1像面10を、結合レンズ7によって、第2像面となる光ファイバ8の入射端面81上へ転写する転写リレー構成としている。従って、ロッド型固体レーザ媒質1の屈折率を $n$ とすれば、ロッド端面102から等価熱レンズ9主面までの距離 $L_{tl}$ を光学距離に換算することによって、第1転写光学系は、(1)式、および(2)式で与えられる関係を満たしている。

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{\frac{L_{tl}}{n} + L_m + L_1 + L_2} + \frac{1}{L_3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{L_4} + \frac{1}{L_5} \quad (2)$$

[0015] また本実施の形態においては、リレーレンズ6は第2転写光学系を構成しており、アパーチャ5を、リレーレンズ6によって結合レンズ7上へ転写している。従って、第2転写光学系は、(3)式で与えられる関係を満たしている。

$$\frac{1}{f2} = \frac{1}{L2} + \frac{1}{L3+L4} \quad (3)$$

[0016]、次に、図2に示すロッド型固体レーザ媒質1の模式図を使用し、本実施に形態において重要な役割を占めるロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズについて詳細に説明する。図2中、点線で示す91は、ロッド型固体レーザ媒質1において、中点101より図中右側の熱レンズ成分と光学的に等価な薄肉レンズを、また92は、中点101より図中左側の熱レンズ成分と光学的に等価な薄肉レンズを示している。また長さ $L_{\text{pump}}$ で示すハッチ領域は、放電ランプや半導体レーザによって励起光が照射される励起領域を、長さ $L_{\text{end}}$ で示すロッド型固体レーザ媒質1の両端部分は、非励起領域を表している。ここでは簡単のため、励起領域内部の励起密度が均一である理想的な状態を想定する。

[0017] ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズは、励起にともなうロッド型レーザ媒質1自体の発熱によって、ロッド型レーザ媒質1の断面内に形成される温度分布によって発生する。ロッド型レーザ媒質1を励起した場合、ロッド断面内においては、中央部で温度が高く外縁部で温度が低い山型の温度分布が形成される。ロッド型固体レーザ媒質1の屈折率は、温度に略比例するため、温度分布によって発生した屈折率分布は収斂作用を呈する。本収斂作用が熱レンズと呼ばれる現象である。本実施の形態においては、まずロッド型固体レーザ媒質1の中点101に対し、図2中、右側の領域の熱レンズについて考える。

[0018] 中点101から右側の領域の熱レンズは、 $L_{\text{pump}}/2$ なる厚みを有している。この厚みのある熱レンズを、焦点距離が等しく光学的に等価な薄肉レンズに置き換えたものが、点線で示す等価熱レンズ91である。励起領域内において励起密度が均一である場合、等価熱レンズ91の主面は、厚みのある実際の熱レンズの中点に位置する。従って、 $L_{\text{tp}}$ で示す励起領域端部から等価熱レンズ主面までの距離は(4)式で与えられる。

$$L_{\text{tp}} = \frac{L_{\text{pump}}}{4} \quad (4)$$

従って、ロッド型固体レーザ媒質1の端面位置Bから、等価熱レンズ91の主面までの

距離 $L_{tl}$ は、ロッド長 $L_{rod}$ と励起領域の長さ $L_{pump}$ を用いて(5)式で表される。

$$L_{tl} = \frac{L_{rod}}{2} - \frac{L_{pump}}{4} \quad (5)$$

なお図2中、92はロッド型固体レーザー媒質1の midpoint 101 に対し、左側に位置する等価熱レンズを示している。

[0019] 図3は、図2において示したロッド型固体レーザー媒質1に、平面鏡からなる部分反射鏡2、および全反射鏡3を、それぞれロッド型固体レーザー媒質1の端面より、距離 $L_m$ なる位置に配した対称安定型光共振器の構成を示している。図4は、図3で示した対称安定型光共振器を、等価熱レンズ91、92を用いて表した光学的に等価な対称安定型光共振器である。図4に示すように、等価熱レンズ91、92で表した対称安定型光共振器では、等価熱レンズ91、92の両者が対称安定型光共振器の midpoint に位置している。図5に示すように、同一位置に配置された同一の焦点距離を有する等価熱レンズ91、92は、等価熱レンズ91、92の2分の1の焦点距離を有する単一の薄肉レンズ93で置き換えることができる。図5に示す薄肉レンズ93の主面から部分反射鏡2、ならびに全反射鏡3までの光学距離は、図3に示す等価熱レンズ91の主面から部分反射鏡2までの光学距離、ならびに等価熱レンズ92の主面から全反射鏡3までの光学距離に等しく、ロッド型固体レーザー媒質1の屈折率 $n$ を考慮すると、 $L_{tl}/n + L_m$ の自由空間として与えられる。

[0020] 図6は、図3で示した対称安定型光共振器中におけるレーザー光のモード形状、即ちビーム伝播状態を示している。図6中、41は、対称安定型光共振器中のレーザー光のビーム外郭形状である。図7は、図5において示したロッド型固体レーザー媒質1の熱レンズを光学的に等価な薄肉レンズで置き換えて示した対称安定型光共振器中におけるレーザー光のモード形状、即ちビーム伝播状態を示している。図7中、42は対称安定型光共振器中のレーザー光のビーム外郭形状、43は部分反射鏡2を出射するレーザー光のビーム外郭形状を示している。ロッド型固体レーザー媒質が均一に励起された理想的な対称安定型光共振器中では、共振器の midpoint に対し、モードの対称性が保証される。また図6、および図7に示す対称安定型光共振器では、部分反射鏡2、および全反射鏡3に平面鏡を使用しているため、光共振器の境界条件から、部分反射

鏡2、および全反射鏡3上におけるレーザ光の波面は必ず平面になる。換言すると、部分反射鏡2、および全反射鏡3上においては、必ずビームウェストが形成される。この結果、図6、および図7で示した対称安定型光共振器中では、中点においてビーム径が最大となる。図6で示すように、実際の対称安定型光共振器中では、共振器の中点Oはロッド型固体レーザ媒質1の内部、中点101に位置する。従って、対称安定型光共振器中でビーム径を制限する開口径は、ロッド型固体レーザ媒質1の直径に略等しくなる。励起媒体中では横多モード発振によって、開口径一杯にまでレーザ光のビーム径は広がる。従って、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズ強度、即ち熱レンズの焦点距離が変化した場合であっても、ロッド型固体レーザ媒質1の中点101におけるレーザ光のビーム径は、ロッド型固体レーザ媒質1の直径に略等しく維持される。すなわち、図7においては、薄肉レンズ93の主面でのビーム径dは、熱レンズの焦点距離が変化しても、ロッド型固体レーザ媒質1の直径に略等しく維持されるということである。

[0021] また上述のように、本実施の形態においては、部分反射鏡2に平面鏡を使用しているため、部分反射鏡2上において必ずビームウェストが形成される。自由空間中においては、ビームウェストの前後でビーム径の対称性が保証されるため、図7に示すように部分反射鏡2を出射し、距離 $L_{tl}/n + L_m$ 伝播後の位置O'におけるビーム径d'も、共振器中点におけるビーム径dと等しくなる。この結果、部分反射鏡2出射後、距離 $L_{tl}/n + L_m$ なる位置O'におけるビーム径も、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、常にロッド型固体レーザ媒質1の直径に略等しく保たれる。

[0022] ここで、第1転写光学系の物体面を第1の基準面と呼ぶことにする。第1の基準面においてはレーザ光のビーム径が、ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズに寄らず略一定であることが望ましい。よって、本実施の形態では、ロッド型固体レーザ媒質1中の等価熱レンズ91の主面を第1の基準面に設定する。また、第1の基準面の、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置を第2の基準面と呼ぶ。本実施の形態では、第2の基準面は図7のO'の位置にあたり、レーザ光のビーム径が第1の基準面におけるビーム径と略等しく維持される位置となる。本実施の形態においては、第2の基準面にアパーチャ5を配置している。



- [0023] 図1に示す本実施の形態においては、部分反射鏡2とアパーチャ5間の距離L1が上述したように $L_{tl}/n + L_m$ と等しくなるよう配置している。即ち、

$$L1 = \frac{L_{tl}}{n} + L_m = \frac{L_{rod}/2 + L_{pump}/4}{n} + L_m \quad (6)$$

従って、アパーチャ5上でのレーザ光のビーム径、ビーム位置は、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、常にロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しく保たれる。

- [0024] 本実施の形態においては、第1転写光学系を用いて、ロッド型固体レーザ媒質1中の等価熱レンズ91の主面を光ファイバ8の入射端面81上へ転写する構成としている。第1転写光学系の物体面に相当する等価熱レンズ91の主面においては、熱レンズの状態によらずビーム径はロッド型固体レーザ媒質1の直径に略等しく維持され、且つ、ロッド型固体レーザ媒質1の内部に存在することが保証されるため、第1転写光学系の像面である光ファイバ8の入射端面81上での、ビーム径、ならびにビーム位置についても、ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズの状態に依らず、常に一定に保つことができる。

- [0025] 本実施の形態での第1転写光学系の転写倍率M1と各光学素子間の距離との関係は、(7)式で与えられる。

$$M1 = \frac{L3}{\frac{L_{tl}}{n} + L_m + L1 + L2} \times \frac{L5}{L4} \quad (7)$$

通常、第1転写光学系の転写倍率M1の値は、使用するロッド型固体レーザ媒質1の直径、光ファイバ8のコア径に応じて、適宜決めればよい。例えば、直径5mmのロッド型固体レーザ媒質1、コア径0.4mmの光ファイバ8を使用する場合、光ファイバ8のコア径に対し、90%基準にてレーザ光を入射させるのであれば、第1の転写光学系の転写倍率M1は0.072となる。

- [0026] また本実施の形態においては、ロッド型固体レーザ媒質1の等価熱レンズ91の主面と、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置に、ロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配置している。そして、第2転写光学系を用いて、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する構成としている。このため、

ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、アパーチャ5上でのビーム径は、ロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しく保たれる。よって、部分反射鏡2を出射するレーザ光4にポインティング変動がなければ、アパーチャ5を透過するレーザ光のビーム径はアパーチャ5の有無によらずほぼ一定である。これにより、第2転写光学系の像面である結合レンズ7上におけるビーム径、ならびにビーム位置を、ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズの状態に依らず、保証することができる。また、部分反射鏡2を出射するレーザ光4にポインティング変動があった場合、アパーチャ5の開口より外側に位置するレーザ光4は、アパーチャ5を透過し得ないため、アパーチャ5を透過するレーザ光はポインティング変動に関係なく常にアパーチャ5の開口の範囲内に存在することとなる。これにより、第2転写光学系の像面である結合レンズ7上におけるレーザ光の照射範囲は、常にポインティング変動の無い場合の照射範囲に含まれる。よって、光ファイバ8へ入射するレーザ光の集束角も略一定の値が維持される。

[0027] ところで上記では、第2の基準面である第2の転写光学系の物体面上にアパーチャを配し、ビームの位置を物理的に規定する構成を示した。しかし、上述したようにポインティングずれが無い場合は、アパーチャの有無に依らず、結合レンズ7上のビーム径は熱レンズに依らず略一定となるので、例えば、ポインティング変動が小さく光ファイバへのビーム集束角の変動が許容範囲であるならば、第2の転写光学系の物体面上にアパーチャを配置しない構成であってもかまわない。以下の実施の形態においても同様である。

[0028] なお、本実施の形態における第2転写光学系の転写倍率M2と各光学素子間の距離との関係は(8)式で与えられる。

$$M2 = \frac{L3 + L4}{L2} \quad (8)$$

また、通常、第2転写光学系の転写倍率M2の値は、所望する光ファイバ8へのビーム集束角に応じて適宜決めればよい。例えば、結合レンズ7からファイバ入射端面81までの距離L5を50mmとし、光ファイバ8入射時の集束角を0.20radとしたい場合、結合レンズ8への入射ビーム径を10mmにすれば、集束角を概ね0.20radとすることができる。ここで、ロッド型固体レーザ媒質の直径dを5mmとすると、第2の基準面

でのビーム径 $d'$ またはアパーチャ5の開口径は5mmとなるので、第2転写光学系の転写倍率 $M2$ の値は2.0に設定すればよい。この関係は、図15に示したように集束角の半角を $\theta$ とすると(9)式で与えられる。

$$M2 = \frac{2 \times L5 \times \tan \theta}{d} \quad (9)$$

[0029] ここで、レンズ等の配置を決定する式は、(1)、(2)、(3)、(7)、(8)、(9)式と、光学系のトータル長さ $L$ を与える(10)式の7式である。

$$L = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 \quad (10)$$

各種前提条件を用いてこれらの式を解くことにより、リレーレンズおよび結合レンズの適切な位置を算出することができる。例えば、共振器の構成は既知とすれば、 $Ltl$ 、 $n$ 、 $Lm$ 、 $L1$ は既知の定数となる。また、レーザ発振器の大きさも決まっているならば、 $L$ も既知の定数となる。さらに、固体レーザ媒質の直径と光ファイバの径も通常既知であるので、第1転写光学系の転写倍率 $M1$ も既知の定数となる。よって、この場合、変数は $L2$ 、 $L3$ 、 $L4$ 、 $L5$ 、 $f1$ 、 $f2$ 、 $M2$ の7つとなり、上記7式から変数を決定することができる。また、例えば、結合レンズやリレーレンズを他のレーザ装置と共用すべく焦点距離 $f1$ 、 $f2$ を固定したい場合は、光学系の長さ $L$ に自由度を持たせるために(10)式を削除したり、共振器の構成に自由度を持たせ $Ltl$ や $Lm$ を変数としたりすること等により、各レンズの配置を決定することができる。

[0030] 図8は本実施の形態に基づき設計した光学系中における、ビーム伝播状況を示すグラフであり、縦軸はビーム直径を、横軸はロッド型固体レーザ媒質1の端面102からの距離を表している。図8中、201は低出力時、即ち熱レンズの焦点距離が比較的長い状態におけるビーム直径を表す曲線、202は中出力時、即ち熱レンズの焦点距離が中程度でのビーム直径を表す曲線、203は高出力時、即ち熱レンズの焦点距離が比較的短い状態におけるビーム直径を表す曲線である。図8に示す設計例は直径4mmのロッド型固体レーザ媒質1を使用した際の光学系中のビーム伝播状況を表しており、アパーチャ5におけるビーム径は、熱レンズに依らずロッド型固体レーザ媒質1の直径4mmに略等しくなっていることが分かる。また第1転写光学系の第1像面10、および結合レンズ7上においても、熱レンズの状態に依らずビーム径は一定と

なる。結合レンズ7上における入射ビーム径が、熱レンズに依らず常に一定の値となるため、光ファイバ8へ入射するレーザ光の集束角も略一定の値が維持される。

[0031] 図9は、レーザ出力に対する光ファイバ入射時のビーム集束角を示すグラフである。図9中、301は本実施の形態に基づき設計した光学系に対するビーム集束角、302は従来の光学系に対するビーム集束角を示している。従来の光学系設計では、レーザ出力の増加にともない、光ファイバ入射時のビーム集束角が低下していたのに対し、本実施の形態に基づく光学系では、レーザ出力に依らず光ファイバ入射時のビーム集束角は略一定に保たれている。ステップインデックス(SI)型の光ファイバを使用した場合、光ファイバ中においても、理想的にはビーム発散角が保存されるため、本実施の形態に基づき光学系を設計すれば、光ファイバ8を出射するレーザ光についても、レーザ出力に依らず略一定の集光性を維持することができる。

[0032] 本実施の形態においては、励起領域が明確に規定されており、励起領域内において均一な励起密度を想定した理想的な状態に対し、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズを想定し、光学系の配置を設定する方法を示した。しかし、実際にロッド型固体レーザ媒質1を放電ランプや半導体レーザを用いて励起した場合には、ロッド型固体レーザ媒質1内での励起光の反射、散乱等によって、励起領域と非励起領域との境界は明確ではない。本実施の形態で示した熱レンズ主面の算定法はあくまで目安であり、(5)式で与えられる位置近傍に等価熱レンズ主面すなわち第1の基準面を設定すればよい。例えば、ロッド型固体レーザ媒質1の端面102から中点101までの範囲内において、第1の基準面となる熱レンズ主面を任意に設定しても、同様な効果を得ることができる。要は設定する等価熱レンズ主面位置に対し、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、リレーレンズ5、および結合レンズ7からなる第1転写光学系を用いて等価熱レンズ9の主面を光ファイバ8の入射端面81に転写リレーするとともに、リレーレンズ6からなる第2転写光学系を用いて、第2の基準面を結合レンズ7上へ転写すればよい。必要であれば、ロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を、第2の基準面に配置すればよい。

[0033] なお本実施の形態においては、リレーレンズおよび結合レンズを使用し、第1の転

写光学系、および第2の転写光学系を構成する実施例を示したが、第1の転写光学系、ならびに第2の転写光学系を構成するレンズは、リレーレンズ、および結合レンズの2枚に限るものではない。例えば、2枚のレンズの組合わせによって形成される等価レンズをリレーレンズと見なし、第1、および第2の転写光学系を構成しても、本実施の形態と同様な効果が得られるばかりでなく、リレーレンズを構成する2枚のレンズ間の距離を変化させれば、リレーレンズの焦点距離を変化させた場合と光学的に等価であるため、第1、第2の転写光学系の転写倍率を一定に維持しながら、容易に光路長を変更させることが可能になる。

また本実施の形態においては、結合レンズに単レンズを使用する構成を示したが、結合レンズに組レンズを使用しても同様な効果が得られるばかりでなく、球面収差の影響が低減され、ファイバ入射ビームの調整裕度を増加させることができる。

以下の実施の形態においても、リレーレンズおよび結合レンズをそれぞれ単レンズで構成された装置にて説明を行うが、上記のように、リレーレンズまたは結合レンズをそれぞれ複数のレンズにて構成してもよい。

[0034] 実施の形態2.

図10(a)は、本発明の実施の形態2におけるロッド型固体レーザ装置の構成を示す模式図である。図10(a)において、11は内部アパーチャであり、部分反射鏡2より距離 $L_a$ なる光共振器内部に配設されている。本実施の形態においては、光共振器内のレーザ光のビーム径、所謂横モードを内部アパーチャ11によって制限している。このため、内部アパーチャ10におけるレーザ光ビーム径、ならびにビーム位置は、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず一定に保たれる。すなわち、本実施の形態における第1の基準面は内部アパーチャ11の位置となる。

[0035] 本実施の形態においては、内部アパーチャ11に対し、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置すなわち第2の基準面に、内部アパーチャ11と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配設している。即ち、(11)式が成り立つ。

$$L_1 = L_a \quad (11)$$

部分反射鏡2上では、光共振器の境界条件からビームウェストであることが保証されるため、ビーム伝播の対称性によって、アパーチャ5においても、ロッド型固体レーザ

媒質1の熱レンズの状態に依らず、ビーム径、およびビーム位置は略一定に保たれる。

- [0036] また本実施の形態においても、前記実施の形態1と同じくリレーレンズ6、および結合レンズ7で第1転写光学系を構成している。但し、本実施の形態においては、内部アパーチャ11を物体面としており、まず内部アパーチャ11を、リレーレンズ6によって第1像面10上に転写する。第1像面10については、前記実施の形態1と同じく、結合レンズ7によって光ファイバ8の入射端面81上へ縮小転写リレーしている。また本実施の形態においては、内部アパーチャ11を第1転写光学系の物体面としているため、前記実施の形態1において示した第1像面上での結像条件を示す(1)式は、(1')式のように変形される。

$$\frac{1}{f1} = \frac{1}{La + L1 + L2} + \frac{1}{L3} \quad (1')$$

なお、(2)式については、本実施の形態においてもそのまま適用することができる。また本実施の形態においても、前記実施の形態1と同じく、リレーレンズ6によって第2転写光学系を構成しており、アパーチャ5は、リレーレンズ6によって、結合レンズ7上へに転写される。従って、前記実施の形態1で示した(3)式の関係は、本実施の形態に対してもそのまま適用することができる。

- [0037] 本実施の形態においては、第1転写光学系の転写倍率M1は、(7')式で与えられる。

$$M1 = \frac{L3}{La + L1 + L2} \times \frac{L5}{L4} \quad (7')$$

また第2転写光学系の転写倍率M2は、前記実施の形態1と同じく、(8)式に従い計算することができる。第1転写光学系の転写倍率M1、第2転写光学系の転写倍率M2については、内部アパーチャ11の開口径に基づき、所望する光ファイバ8の入射端面81上でのビーム径、光ファイバ8入射時のビーム集束角に対し、適切な値に設定すればよい。

- [0038] 本実施の形態においては、第1転写光学系の物体面上におけるビーム径、ならびにビーム位置が、内部アパーチャ11によって保証されているため、第1転写光学系

の像面である光ファイバ8の入射端面81上におけるレーザ光4のビーム径、ならびにビーム位置についても、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、常に一定に保つことができる。

[0039] また本実施の形態においては、第1基準面である内部アパーチャ11と、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置である第2基準面に、内部アパーチャ11と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配置し、第2転写光学系を用いて、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する構成としている。このため、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、アパーチャ5上でのビーム径は、内部アパーチャ11の開口径と略等しく保たれることに加え、アパーチャ5の開口より外側に位置するレーザ光4は、アパーチャ5を透過することができないため、部分反射鏡2を出射するレーザ光4にポインティング変動等が発生した場合であっても、第2転写光学系の像面である結合レンズ7上におけるビーム径、ならびにビーム位置が保証される。この結果、ロッド型固体レーザ媒質1の熱レンズの状態に依らず、光ファイバ8へ入射するレーザ光4の集束角は略一定に保たれ、光ファイバ8を出射するレーザ光4についても、レーザ出力に依らず略一定の集光性を維持することができる。

[0040] ところで、上記においては内部アパーチャ11をロッド型固体レーザ媒質1と部分反射鏡2との間に配置したが、ロッド型固体レーザ媒質1と全反射鏡3の間に配置してもよい。この場合、共振器内のレーザビームの対称性により、部分反射鏡2側に全反射鏡3と同様な距離だけ部分反射鏡2からはなして配置した場合、すなわちロッド型固体レーザ媒質の中心101に対して、対称な位置に配置した場合と等価である。例えば、図10(b)に示したように、内部アパーチャ11を全反射鏡3側で全反射鏡3から $L_a$ の距離に配置した場合、内部アパーチャ11の効果は図10(a)と等価になる。よって、光学系の配置は、図10(b)に示した様に図10(a)と同等に配置することで、同様な効果が得られる。

[0041] なお本実施の形態に示すように、部分反射鏡2に平面鏡を使用し、光共振器内部のビーム径を内部アパーチャ11で制限する構成については、対称型共振器構成に限るものではなく、非対称型共振器についても、本実施の形態に従い、アパーチャ5、リレーレンズ6、結合レンズ7、光ファイバ8を配置すれば、本実施の形態と同様な効

果が得られることは言うまでもない。

[0042] 実施の形態3.

図11は、本発明の実施の形態3におけるロッド型固体レーザ装置の構成を示す模式図である。本実施の形態においては、リレーレンズ6、ならびに結合レンズ7からなる第1転写光学系を用いて、ロッド型固体レーザ媒質1の端面102を第1像面10上に転写するとともに、第1像面10を光ファイバ8の入射端面81上に転写している。また前記実施の形態1、2と同じく、リレーレンズ6により第2転写光学系を構成し、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する構成としている。

[0043] 本実施の形態においては、ロッド型固体レーザ媒質1の端面102と、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置にロッド型固体レーザ媒質1の直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配設している。即ち、(11')式が成り立つ。

$$L1 = Lm \quad (11')$$

従って、第1像面上での結像条件は、(1'')式のように与えられる。

$$\frac{1}{f1} = \frac{1}{Lm + L1 + L2} + \frac{1}{L3} \quad (1'')$$

なお光ファイバ8の入射端面8上での結像条件を与える(2)式、ならびに結合レンズ7上での結像条件を与える(3)式については、本実施の形態に対してもそのまま適用することができる。

[0044] 本実施の形態においては、ロッド型固体レーザ媒質1の端面102を、第1転写光学系の物体面すなわち第1の基準面に設定している。ロッド型固体レーザ媒質1の端面102における、熱レンズが変化した際のビーム径の変化は、前記実施の形態1の等価熱レンズ9主面、ならびに前記実施の形態2の内部アパーチャ11に比べやや大きくなるものの、内部アパーチャ11等によりビーム径を制限する場合を除き、ロッド型固体レーザ媒質1外部でのビーム径の変化に比べ小さく、またビームは常にロッド型固体レーザ媒質1の端面102内にあることが保証される。このため、第1転写光学系によって光ファイバ8の入射端面81上に結像されるビームは、物体面であるロッド端面102上で想定される最大ビーム径、即ちロッド型固体レーザ媒質1の直径と等しくなった場合に、ファイバ入射端面81上に結像されるビームよりも、常に内側に位置する



ことが保証される。この結果、ロッド型固体レーザー媒質1の熱レンズが変化した場合であっても光ファイバ8の入射端面81において、常にレーザー光4を光ファイバ8のコア内部に維持することができる。

- [0045] またアパーチャ5は、第1の基準面であるロッド型固体レーザー媒質1の端面102に対し、部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置である第2の基準面に配置されているため、アパーチャ5上でのビーム径については、ビーム伝播の対称性から常にロッド型固体レーザー媒質1の直径よりも小さくなることが保証される。加えてアパーチャ5の開口径は、ロッド型固体レーザー媒質1の直径と略等しく設定されているため、レーザー光4にポインティング変動等が発生した場合であっても、結合レンズ7上におけるビームの位置は常に一定に保たれ、またビーム径はアパーチャ5の開口径、ならびに第2転写光学系の転写倍率によって決まる一定の値よりも常に小さくなることが保証される。この結果、ロッド型固体レーザー媒質1の熱レンズの状態に依らず、光ファイバ8へ入射するレーザー光4の集束角は常に一定値以下に保たれ、光ファイバ8を射出するレーザー光4についても、レーザー出力に依らず一定値以上の集光性を維持することができる。

[0046] 実施の形態4.

図12(a)は、本発明の実施の形態4におけるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。図12(a)中、1aは、平面鏡からなる部分反射鏡2、全反射鏡3によって構成した光共振器中に配置された第1のロッド型固体レーザー媒質、1bは第2のロッド型固体レーザー媒質を示しており、第1および第2のロッド型固体レーザー媒質1a、1bはともに、 $L_{rod}$ なる長さを有している。また本実施の形態においては、部分反射鏡2と第1のロッド型固体レーザー媒質1a間の距離を $L_m$ 、第1のロッド型固体レーザー媒質1aと第2のロッド型固体レーザー媒質1b間の距離を $2L_m$ 、第2の固体レーザー媒質1bと全反射鏡3間の距離を $L_m$ に設定し、所謂周期型共振器を構成している。このため、第1および第2の固体レーザー媒質1a、1bが均等に励起されている理想的な条件においては、第1、および第2のロッド型固体レーザー媒質1a、1b中のビーム径、換言するとモード形状は、例えば図6に示すような単一のロッド型固体レーザー媒質1を使用し、対称安定型光共振器を構成した場合と同一になる。即ち、周期型共振器を構成すれ

ば、複数のロッド型固体レーザー媒質1を使用し、集光性を一定に保ちながら、容易に高出力化を図ることができる。

[0047] 本実施の形態においても、アパーチャ5、リレーレンズ6、結合レンズ7、光ファイバ8の入射端面81については、前記実施の形態1と同一基準で配置している。即ち、第1のロッド型固体レーザー媒質1aの端面102より距離 $L_{tl}$ に位置する等価熱レンズ9の主面を第1の基準面とし、この第1の基準面と部分反射鏡2を中点として光学的に対称な位置である第2の基準面にロッド型固体レーザー媒質1aの直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配する。リレーレンズ6と結合レンズ7で第1転写光学系を構成し、等価熱レンズ9の主面をリレーレンズ6によって第1像面10上へ転写するとともに、第1像面10を結合レンズ7によって、光ファイバ8の入射端面81上に転写する。またリレーレンズ6によって第2転写光学系を構成し、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写している。

[0048] 本実施の形態に示すように、単一の光共振器中に複数のロッド型固体レーザー媒質1を配置し、周期型共振器を構成する場合であっても、前記実施の形態1と同一の方法にて、アパーチャ5、リレーレンズ6、結合レンズ7、光ファイバ8の入射端面81を配置すれば、前記実施の形態1と同様な効果が得られるばかりでなく、略一定の集光性を維持しながら容易に高出力化を図ることができる。

[0049] なお本実施の形態においては、単一の光共振器中に2本のロッド型固体レーザー媒質1a、1bを配置する構成について示したが、光共振器中に配置するロッド型固体レーザー媒質1の数はこれに限るものではない。例えば、所望するレーザー出力に応じて、光共振器中へ配置するロッド型固体レーザー媒質1の数を選定し、部分反射鏡2と隣接するロッド型固体レーザー媒質1間の距離、ならびに全反射鏡3と隣接するロッド型固体レーザー媒質1間の距離を $L_m$ に設定するとともに、相対面するロッド型固体レーザー媒質1間の距離を $2L_m$ に設定すれば、ロッド型固体レーザー媒質1の数に依らず、周期型共振器を構成することができる。

[0050] また複数のロッド型固体レーザー媒質1を単一の光共振器中に配置する本実施の形態においては、前記実施の形態1と同じく、部分反射鏡2に隣接するロッド型固体レーザー媒質1aの等価熱レンズ9主面を、第1転写光学系の物体面とする構成を示した

が、第1転写光学系の物体面はこれに限るものではない。例えば、図12(b)に示したように前記実施の形態2と同じく、光共振器中に内部アパーチャ11を設置する構成に対しては、内部アパーチャ11を第1の基準面として第1転写光学系の物体面とすることにより、前記実施の形態2と同様な効果を得ることができる。図12(b)とは異なり、ロッド型固体レーザ媒質1と全反射鏡3の間に内部アパーチャ11を配置した場合、実施の形態2で述べたようにロッド型固体レーザ媒質の中心101に対して、対称な位置に内部アパーチャ11を配置した場合と等価と考えればよい。また前記実施の形態3と同じく、部分反射鏡2に隣接するロッド型固体レーザ媒質1aの端面102を第1の基準面として第1転写光学系の物体面とすれば、前記実施の形態3と同様な効果を得ることができる。要は光共振器内部の適当な位置に第1の基準面をとって、リレーレンズ6、および結合レンズ7からなる第1転写光学系の物体面を設定し、リレーレンズ6によって該物体面を第1像面に転写し、更に第1像面を結合レンズ7によって光ファイバ8の入射端面81上へ縮小転写リレーするとともに、光共振器中に設定された第1転写光学系の物体面に対し、部分反射鏡2を中点として、光学的に対称な位置にアパーチャ5を設置し、リレーレンズ6からなる第2転写光学系によって、第2転写光学系の物体面であるアパーチャ5を、結合レンズ7上へ転写する構成とすればよい。

[0051] 実施の形態5.

図13は、本発明の実施の形態5によるロッド型固体レーザ装置の構成を示す模式図である。本実施の形態においては、3本のロッド型固体レーザ媒質1a、1b、1cを使用しており、第3のロッド型固体レーザ媒質1cのみを、部分反射鏡2、および全反射鏡3からなる光共振器中に配置し、レーザ光を発生させる発振器として使用するとともに、第1、第2のロッド型固体レーザ媒質1a、1bは、発振器から発せられたレーザ光を増幅する増幅器として使用する所謂MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)構成を採用している。本実施の形態において3本のロッド型固体レーザ媒質1a、1b、1cは、距離 $2L_m$ をもって等間隔に配置されている。また第2のロッド型固体レーザ媒質1bと第3のロッド型固体レーザ媒質1cの間に平面鏡からなる部分反射鏡2を、第3のロッド型固体レーザ媒質1cより距離 $L_m$ なる位置に平面鏡からなる全反射鏡3を配設している。本実施の形態に示すように、複数のロッド型固体レーザ媒質1を

使用するロッド型固体レーザ装置において、複数のロッド型固体レーザ媒質1を距離 $2L_m$ なる等間隔で配置し、末端に配置されたロッド型固体レーザ媒質1の端面より距離 $L_m$ なる位置に全反射鏡3を配設するとともに、任意のロッド型固体レーザ媒質1の中間に部分反射鏡2を配設する周期型MOPA構成を採用すれば、複数のロッド型固体レーザ媒質1が全て均等に励起されている理想的な条件においては、前記周期型共振器の場合と同じく、各ロッド型固体レーザ媒質1中でのモード形状の周期性が保存される。従って、本実施の形態に示す周期型MOPA構成を使用しても、複数のロッド型固体レーザ媒質1を使用し、集光性を略一定に保ちながら、容易に高出力化を図ることができる。周期型MOPA構成については、複数のロッド型固体レーザ媒質1を用いたロッド型固体レーザ装置においては一般的な構成であり、光共振器中に配設するロッド型固体レーザ媒質1の数、増幅器に用いるロッド型固体レーザ媒質1の数は、所望する性能に応じて選定すればよい。

[0052] 次に本実施の形態、即ち周期型MOPA構成に対する光学系の配置方法について説明する。周期型MOPA構成においては、レーザ光4が出射する最終段のロッド型固体レーザ媒質1aの端面102より、ロッド型固体レーザ媒質1a、1b、1cの設置間隔 $2L_m$ に対し $1/2$ なる距離 $L_m$ の位置に、第3の基準面2'を設定する。この第3の基準面2'を中点とし、第1の基準面となる第1のロッド型固体レーザ媒質1aの等価熱レンズ9主面と対称な位置すなわち第2の基準面に、ロッド型固体レーザ媒質1aの直径と略等しい開口を有するアパーチャ5を設置する。すなわち、第3の基準面は、第2の基準面を設定する際に実施の形態1～4の部分反射鏡と同様の作用を有することとなるので、第3の基準面を仮想部分反射鏡と呼ぶ。以下、前記実施の形態1と同じく、リレーレンズ6、ならびに結合レンズ7によって第1転写光学系を構成し、まずリレーレンズ6にてロッド型固体レーザ媒質1aの等価熱レンズ9の主面を第1像面10上へ転写するとともに、結合レンズ7により第1像面10を光ファイバ8の入射端面81上に縮小転写リレーする。加えて、リレーレンズ6は第2転写光学系を構成しており、リレーレンズ6によって、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する。従って、本実施の形態においても、前記実施の形態1にして示した、(1)式乃至(3)式をそのまま適用することができる。

[0053] 周期MOPA構成においても、ロッド型固体レーザ媒質1中でのモード形状の周期性が略一定に保存されるため、前記実施の形態1と同一の方法にて、アパーチャ5、リレーレンズ6、結合レンズ7、光ファイバ8の入射端面81を配置すれば、前記実施の形態1と同様な効果が得られるばかりでなく、略一定に集光性を維持しながら容易に高出力化を図ることができる。なお、前記実施の形態4にて示した周期共振器構成と本実施の形態で示した周期MOPA構成を比較すると、周期共振器構成の場合には、全てのロッド型固体レーザ媒質1が光共振器内部に配置されているため、取り出されるレーザ光4中での自然放出光の割合が低いことに加え、光共振器の境界条件によってビームウェスト位置が固定されるため、集光性に優れたレーザ光4を発生させることが容易であるという長所がある。一方、光共振器中に多数のロッド型固体レーザ媒質1が配置されるため、各ロッド型固体レーザ媒質1間の励起状態のばらつきによって、光共振器の安定条件が容易に崩れ、不安定発振を起し易いという短所も内在している。周期MOPA構成については、増幅器から発せられる自然放出光が容易に増幅されるため、レーザ光4中に占める自然放出光の割合が増加することに加え、光共振器の境界条件によってビームウェスト位置が固定されることがないため、集光性が容易に低下するという短所がある。また低強度のレーザ光4では増幅器中の利得を十分に取り出すことができず、レーザ光の発生効率が低下するという短所もある。一方、周期共振器光共振器と同一数のロッド型固体レーザ媒質1を使用する場合であっても、光共振器中に配置するロッド型固体レーザ媒質1の数は少なくすることができるので、各ロッド型固体レーザ媒質1間で、励起状態にばらつきが生じた場合であっても、安定にレーザ光4を発生させることができるという長所がある。

[0054] また本実施の形態においては、レーザ光の出射端に位置するロッド型固体レーザ媒質1aの等価熱レンズ9主面を、第1の基準面である第1転写光学系の物体面とする構成を示したが、第1転写光学系の物体面はこれに限るものではない。例えば、前記実施の形態3と同じく、仮想部分反射鏡2'を中点として、レーザ光の出射端に位置するロッド型固体レーザ媒質1aの端面102と対称な位置すなわち第2の基準面に、ロッド型固体レーザ媒質1aの直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配設するとともに、ロッド型固体レーザ媒質1aの端面102を第1の基準面である第1転写光

光学系の物体面とし、光ファイバ8の入射端面81上へ転写リレーする構成とすれば、前記実施の形態3と同様な効果を得ることができる。

- [0055] なお上記説明では、ロッド型固体レーザー媒質1aの等価熱レンズ9、もしくは端面102を、第1の基準面である第1転写光学系の物体面として設定する方法を示したが、第1転写光学系の物体面の設定方法はこれに限るものではない。例えば、ロッド型固体レーザー媒質1aの端面102から中点101までの範囲内において、基準となる熱レンズ主面を任意に設定しても、同様な効果を得ることができる。要は設定する等価熱レンズ主面位置に対し、仮想部分反射鏡2'を中点として光学的に対称な位置すなわち第2の基準面にロッド型固体レーザー媒質1の直径と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配置するとともに、リレーレンズ6、および結合レンズ7からなる第1転写光学系を用いて等価熱レンズ9の主面を光ファイバ8の入射端面81に転写リレーするとともに、リレーレンズ6からなる第2転写光学系を用いて、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する構成とすれば、ロッド型固体レーザー媒質1の熱レンズが変化したり、レーザー光4にポインティング変動が発生した場合であっても、結合レンズ7上におけるビーム径、ビーム位置を略一定に維持するとともに、光ファイバ8の入射端面81上でのビーム径、ビーム位置を保証し、光ファイバ8による安定なビーム伝送が可能になるとともに、光ファイバ8を出射するレーザー光4についても、集光性を略一定に保つことができる。

[0056] 実施の形態6.

図14(a)は、本発明の実施の形態6によるロッド型固体レーザー装置の構成を示す模式図である。本実施の形態においても、前記実施の形態5と同じく、複数のロッド型固体レーザー媒質1a、1b、1cを等間隔で配置し、周期MOPA構成を採用している。なお本実施の形態においては、部分反射鏡2、ならびに全反射鏡3から構成される光共振器中に内部アパーチャ11を挿入し、レーザー光4のビーム径を制限している。増幅器として使用されるロッド型固体レーザー媒質1b、1c中においても、レーザー光4が通過する部分でのみ増幅作用を被るため、第1のロッド型固体レーザー媒質1a中のモード形状が、増幅器中においても略保存される。本実施の形態においては、内部アパーチャ11は、部分反射鏡2より距離Laなる位置に設置されている。

- [0057] 次に本実施の形態に対する光学系の配置方法について説明する。まず前記実施の形態5と同じく、レーザ光4が出射する最終段のロッド型固体レーザ媒質1aの端面102より距離 $L_m$ なる位置に、仮想部分反射鏡2'を想定する。次に仮想部分反射鏡2'より第1のロッド型固体レーザ媒質1aの方向で、距離 $L_a$ なる位置を第1の基準面としてここに、仮想内部アパーチャ11'を想定する。仮想部分反射鏡2'を中点とし、仮想内部アパーチャ11'と光学的に対称な位置を第2の基準面としてここに、内部アパーチャ11と略等しい開口径を有するアパーチャ5を配置する。従って、周期MOPA構成に対しても、前記実施の形態2にて示した(11)式を適用することができる。以下、前記実施の形態1と同じく、リレーレンズ6、ならびに結合レンズ7によって第1転写光学系を構成し、まずリレーレンズ6にて仮想内部アパーチャを第1像面10上へ転写するとともに、結合レンズ7により第1像面10を光ファイバ8の入射端面81上に縮小転写リレーする。また、リレーレンズ6は第2転写光学系を構成しており、リレーレンズ6によって、アパーチャ5を結合レンズ7上へ転写する。従って、本実施の形態においても、前記実施の形態2にして示した(1')式、前記実施の形態1にて示した(2)乃至(3)式を適用することができる。
- [0058] また、図14(a)とは異なり、図14(b)に示したようにロッド型固体レーザ媒質1cと全反射鏡3の間に内部アパーチャ11を配置した場合、実施の形態2で述べたように部分反射鏡2側に全反射鏡3と同様な距離だけ部分反射鏡2からはなして内部アパーチャ11を配置した場合と等価と考えればよい。すなわち、内部アパーチャ11を全反射鏡3から $L_a$ の距離に配置した場合は、図14(b)に示したように、図14(a)と同様の配置にて光学系の配置を決定すればよい。
- [0059] 本実施の形態に示すように、周期MOPA構成において、光共振器に内部アパーチャ11を挿入し、ビーム径を制限する方式においても、ロッド型固体レーザ媒質1中でのモード形状の周期性が略一定に保存されるため、前記実施の形態2と同様な効果が得られるばかりでなく、一定の集光性を維持しながら容易に高出力化を図ることができる。
- [0060] なお、本実施の形態では、光共振器中にのみ内部アパーチャ11を挿入し、ビーム径を制限する構成を示したが、光共振器に挿入する内部アパーチャ11に加え、増幅

器として使用する任意のロッド型固体レーザ媒質1の近傍に、ビーム径を制限するアパーチャを設けてもよい。例えば、仮想内部アパーチャ11'を設置する位置に、内部アパーチャ11と略等しい開口径を有する実際のアパーチャを設置すれば、増幅器として使用するロッド型固体レーザ媒質中で発生したビームポインティング変動や、レーザ光4のビーム品質を劣化させる自然放出増幅光の影響を抑制し、更に安定かつ信頼性の高い光ファイバ8を用いたレーザ光4の伝送が可能になる。

- [0061] また上記説明では、ロッド型固体レーザ媒質として、Nd(ネオジウム)がドープされたYAG(イットリウムアルミニウムガーネット)結晶を使用した構成について示したが、固体レーザ媒質の種類はこれに限るものではなく、例えばリン酸ガラスやバナデート結晶等を使用した場合であっても、同様な効果が得られることは言うまでもない。

#### 産業上の利用可能性

- [0062] 本発明に係るロッド型固体レーザ装置は、光ファイバーを用いてレーザ光を伝送し加工を行う装置に適している。



## 請求の範囲

- [1]      ロッド型固体レーザー媒質と部分反射鏡及び全反射鏡からなる対称安定型光共振器から出力されたレーザー光を、リレーレンズと結合レンズを用いて光ファイバへ入射するロッド型固体レーザー装置において、  
前記部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザー媒質の前記部分反射鏡に対向する端面と、このロッド型固体レーザー媒質の midpoint との間の任意の位置に第1の基準面を設定し、  
該第1の基準面と、前記部分反射鏡に対し光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、  
前記リレーレンズは、前記第1の基準面を第1像面に転写するとともに前記第2の基準面を前記結合レンズ上に転写する位置に配置され、  
前記結合レンズは、前記第1像面を光ファイバ端面に転写する位置に配置されたことを特徴とするロッド型固体レーザー装置。
- [2]      前記部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザー媒質の前記部分反射鏡に対向する端面と、このロッド型固体レーザー媒質の midpoint との間で形成される熱レンズと光学的に等価な薄肉レンズを想定し、この想定した薄肉レンズの主面の位置に前記第1の基準面を設定することを特徴とする請求の範囲1に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [3]      前記部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザー媒質の前記部分反射鏡に対向する端面に、前記第1の基準面を設定することを特徴とする請求の範囲1に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [4]      前記第2の基準面の位置にアパーチャを配置したことを特徴とする請求の範囲1～3いずれかに記載のロッド型固体レーザー装置。
- [5]      前記アパーチャの開口径は、前記ロッド型固体レーザー媒質の直径と略等しいものであることを特徴とする請求の範囲4に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [6]      前記ロッド型固体レーザー媒質が単数であることを特徴とする請求の範囲1に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [7]      前記ロッド型固体レーザー媒質が複数であることを特徴とする請求の範囲1に記載の

ロッド型固体レーザ装置。

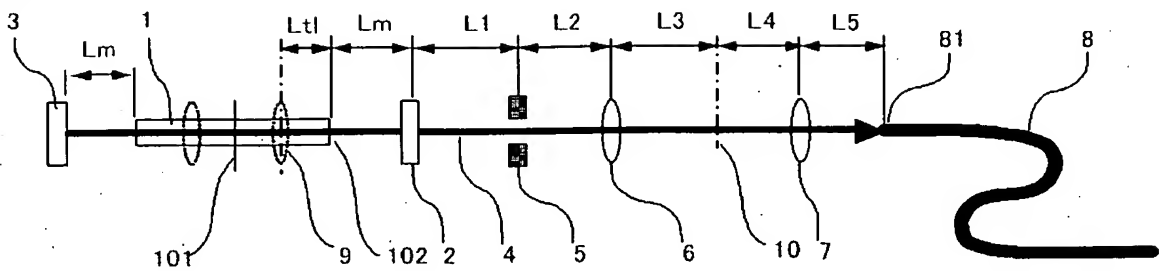
- [8]     ロッド型固体レーザ媒質と全反射鏡及び平面鏡である部分反射鏡からなる安定型光共振器から出力されたレーザ光を、リレーレンズと結合レンズを用いて光ファイバへ入射するロッド型固体レーザ装置において、  
前記部分反射鏡と、前記部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザ媒質の midpoint との間で、レーザ光のビーム径が前記ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズに依らず一定となる位置に第1の基準面を設定し、  
該第1の基準面と、前記部分反射鏡に対し光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、  
前記リレーレンズは、前記第1の基準面を第1像面に転写するとともに前記第2の基準面を前記結合レンズ上に転写する位置に配置され、  
前記結合レンズは、前記第1像面を光ファイバ端面に転写する位置に配置されたことを特徴とするロッド型固体レーザ装置。
- [9]     前記ロッド型固体レーザ媒質と前記部分反射鏡との間にビーム径を制限する内部アパーチャを備え、  
この内部アパーチャの位置に第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲8に記載のロッド型固体レーザ装置。
- [10]    前記ロッド型固体レーザ媒質と前記全反射鏡との間にビーム径を制限する内部アパーチャを備え、  
前記部分反射鏡からロッド型固体レーザ媒質側の、前記内部アパーチャと前記全反射鏡間と略等しい距離に第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲8に記載のロッド型固体レーザ装置。
- [11]    前記第2の基準面の位置にアパーチャを配置したことを特徴とする請求の範囲8～10のいずれかに記載のロッド型固体レーザ装置。
- [12]    前記アパーチャの開口径は、前記内部アパーチャの開口径と略等しいものであることを特徴とする請求の範囲11に記載のロッド型固体レーザ装置。
- [13]    前記ロッド型固体レーザ媒質が単数であることを特徴とする請求の範囲8～10のいずれかに記載のロッド型固体レーザ装置。

- [14] 前記ロッド型固体レーザー媒質が複数であることを特徴とする請求の範囲8~10のいずれかに記載のロッド型固体レーザー装置。
- [15] 等間隔で配置された複数のロッド型固体レーザー媒質を備え、末端に配置されたロッド型固体レーザー媒質から、ロッド型固体レーザー媒質の配置間隔の略 $1/2$ の距離に、平面鏡からなる全反射鏡を配置し、任意のロッド型固体レーザー媒質間の略中点なる位置に平面鏡からなる部分反射鏡を配置して前記全反射鏡との間で光共振器を構成し、この光共振器外のロッド型固体レーザー媒質を増幅器として使用して前記光共振器から出射したレーザー光を増幅し、リレーレンズと結合レンズを用いてレーザー光を光ファイバへ入射するロッド型固体レーザー装置において、  
レーザー光出射側の末端に位置するロッド型固体レーザー媒質のレーザー光出射側の端面から、前記ロッド型固体レーザー媒質の配置間隔の略 $1/2$ の距離に、仮想部分反射鏡を想定し、  
前記仮想部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザー媒質の前記仮想部分反射鏡に対向する端面と、このロッド型固体レーザー媒質の中点との間の任意の位置に第1の基準面を設定し、  
該第1の基準面と、前記仮想部分反射鏡に対し光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、  
前記リレーレンズは、前記第1の基準面を第1像面に転写するとともに前記第2の基準面を前記結合レンズ上に転写する位置に配置され、  
前記結合レンズは、前記第1像面を光ファイバ端面に転写する位置に配置されたことを特徴とするロッド型固体レーザー装置。
- [16] 前記仮想部分反射鏡に隣接するロッド型固体レーザー媒質の前記仮想部分反射鏡に対向する端面と中点との間で形成される熱レンズと光学的に等価な薄肉レンズを想定し、この想定した薄肉レンズの主面の位置に前記第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲15に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [17] 前記仮想部分反射鏡に隣接するロッド型固体レーザー媒質の前記仮想部分反射鏡に対向する端面に、前記第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲15に記載のロッド型固体レーザー装置。

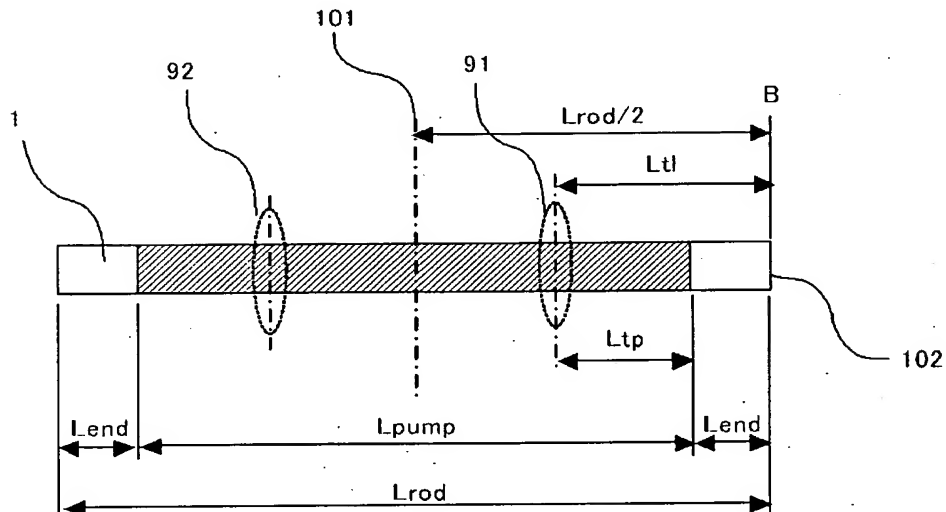
- [18] 前記第2の基準面の位置にアパーチャを配置したことを特徴とする請求の範囲15～17のいずれかに記載のロッド型固体レーザ装置。
- [19] 前記アパーチャの開口径は、前記ロッド型固体レーザ媒質の直径と略等しいものであることを特徴とする請求の範囲18に記載のロッド型固体レーザ装置。
- [20] 等間隔で配置された複数のロッド型固体レーザ媒質を備え、末端に配置されたロッド型固体レーザ媒質から、ロッド型固体レーザ媒質の配置間隔の略 $1/2$ の距離に、平面鏡からなる全反射鏡を配置し、任意のロッド型固体レーザ媒質間の略中点なる位置に平面鏡からなる部分反射鏡を配置して前記全反射鏡との間で光共振器を構成し、この光共振器外のロッド型固体レーザ媒質を増幅器として使用して前記光共振器から出射したレーザ光を増幅し、リレーレンズと結合レンズを用いてレーザ光を光ファイバへ入射するロッド型固体レーザ装置において、  
レーザ光出射側の末端に位置するロッド型固体レーザ媒質のレーザ光出射側の端面から、前記ロッド型固体レーザ媒質の配置間隔の略 $1/2$ の距離に、仮想部分反射鏡を想定し、  
前記仮想部分反射鏡と、前記仮想部分反射鏡に隣接して配置されたロッド型固体レーザ媒質の中点との間で、レーザ光のビーム径が前記ロッド型固体レーザ媒質の熱レンズに依らず一定となる位置に第1の基準面を設定し、  
該第1の基準面と、前記仮想部分反射鏡に対し光学的に対称な位置に第2の基準面を設定し、  
前記リレーレンズは、前記第1の基準面を第1像面に転写するとともに前記第2の基準面を前記結合レンズ上に転写する位置に配置され、  
前記結合レンズは、前記第1像面を光ファイバ端面に転写する位置に配置されたことを特徴とするロッド型固体レーザ装置。
- [21] 前記光共振器中の前記部分反射鏡に隣接するロッド型固体レーザ媒質と前記部分反射鏡間にビーム径を制限する内部アパーチャを備え、  
前記仮想部分反射鏡からロッド型固体レーザ媒質側の、前記内部アパーチャと前記部分反射鏡間と略等しい距離に第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲20に記載のロッド型固体レーザ装置。

- [22] 前記光共振器中の前記全反射鏡に隣接するロッド型固体レーザー媒質と前記全反射鏡間にビーム径を制限する内部アパーチャを備え、  
前記仮想部分反射鏡からロッド型固体レーザー媒質側の、前記内部アパーチャと前記全反射鏡間と略等しい距離に第1の基準面を設定したことを特徴とする請求の範囲20に記載のロッド型固体レーザー装置。
- [23] 前記第2の基準面の位置にアパーチャを配置したことを特徴とする請求の範囲20～22のいずれかに記載のロッド型固体レーザー装置。
- [24] 前記アパーチャの開口径は、前記内部アパーチャの開口径と略等しいものであることを特徴とする請求の範囲23に記載のロッド型固体レーザー装置。

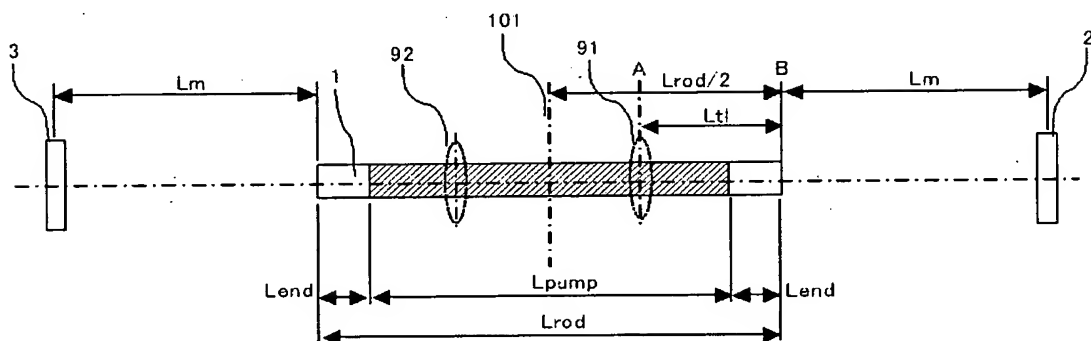
[図1]



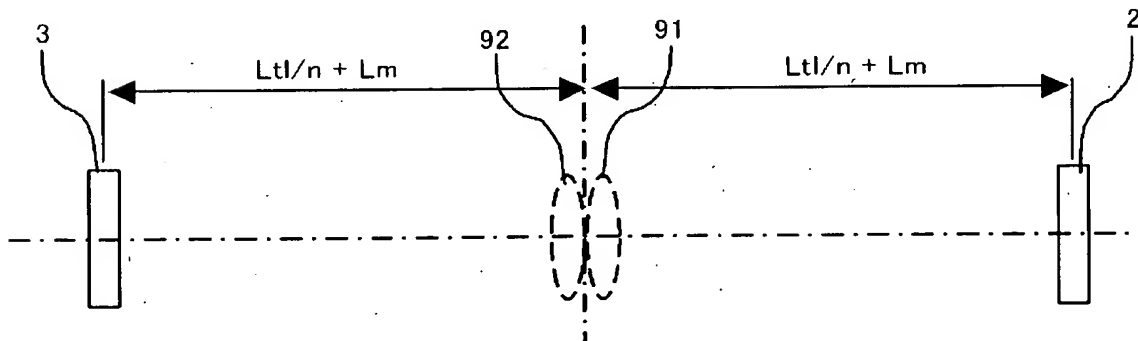
[図2]



[図3]



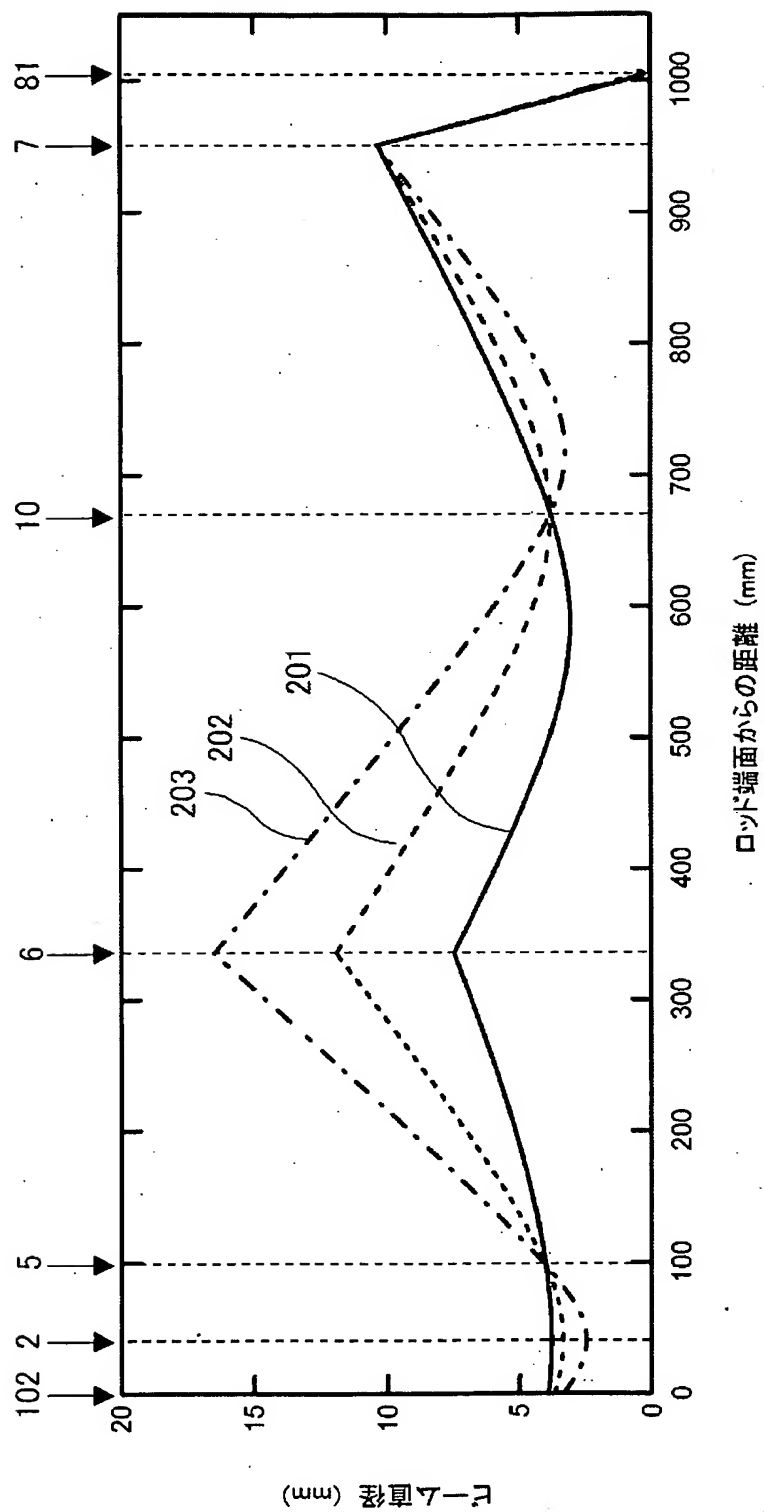
[図4]



**PCT/JP2005/016933**

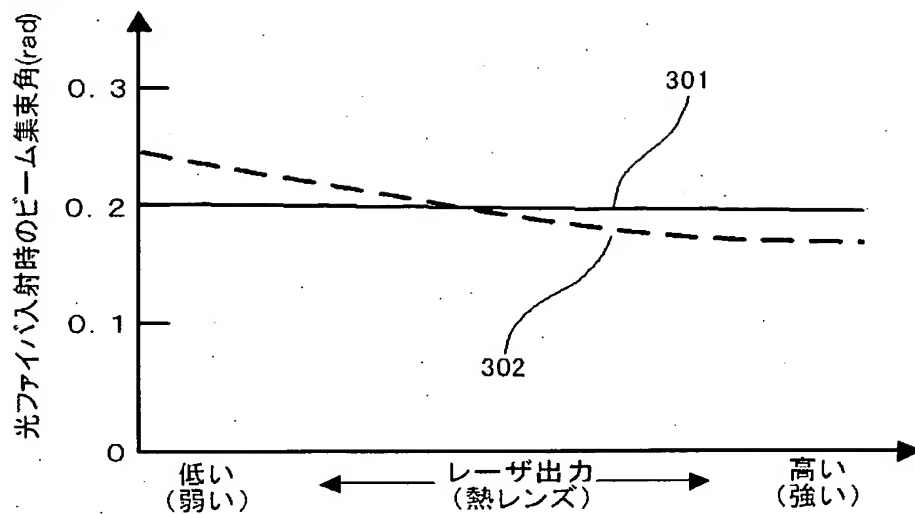
The diagram shows a laser resonator with two mirrors, 1 and 2, separated by a distance  $L_m$ . A pump section is located between the mirrors, containing a gain medium 41 and a pump source 91. The pump section has a length  $L_{rod}$  and a pump beam diameter  $L_{rod}/2$ . The gain medium 41 has a length  $L_{pump}$  and a diameter  $L_{tl}$ . The mirrors 1 and 2 have a diameter  $L_{end}$ . The diagram also shows the optical axis and the beam path.

[図8]



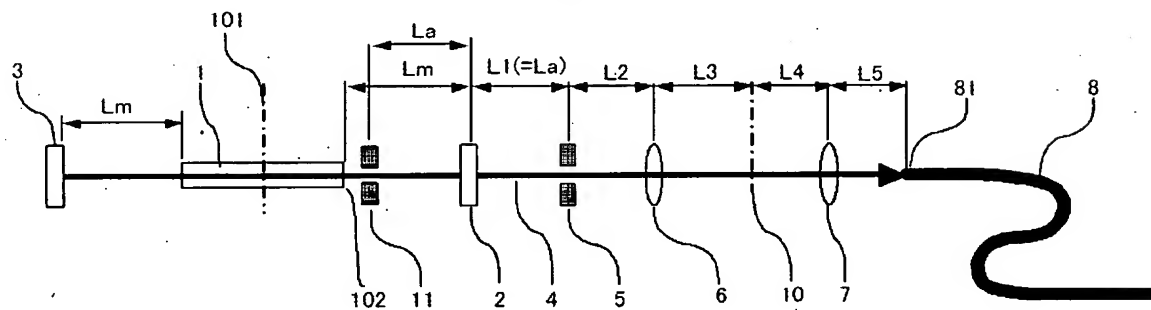


[図9]

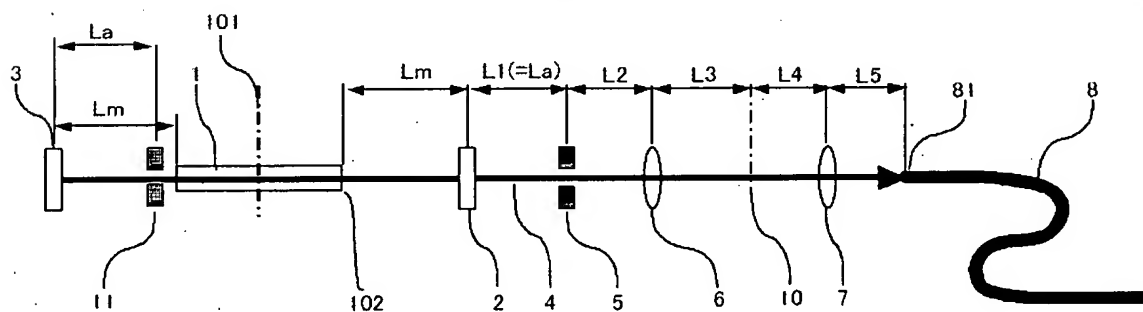


[図10]

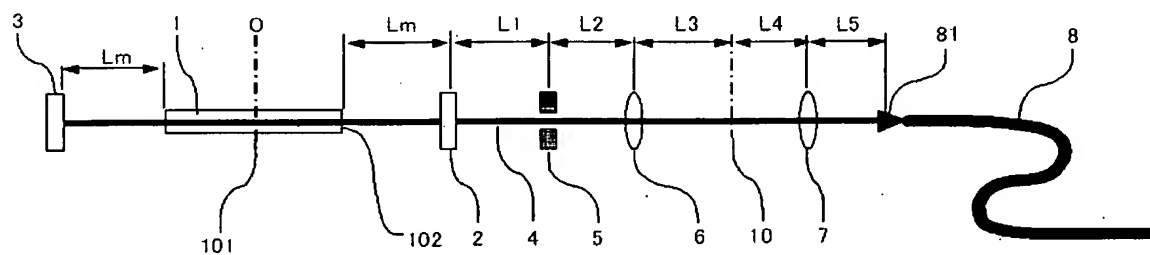
(a)



(b)



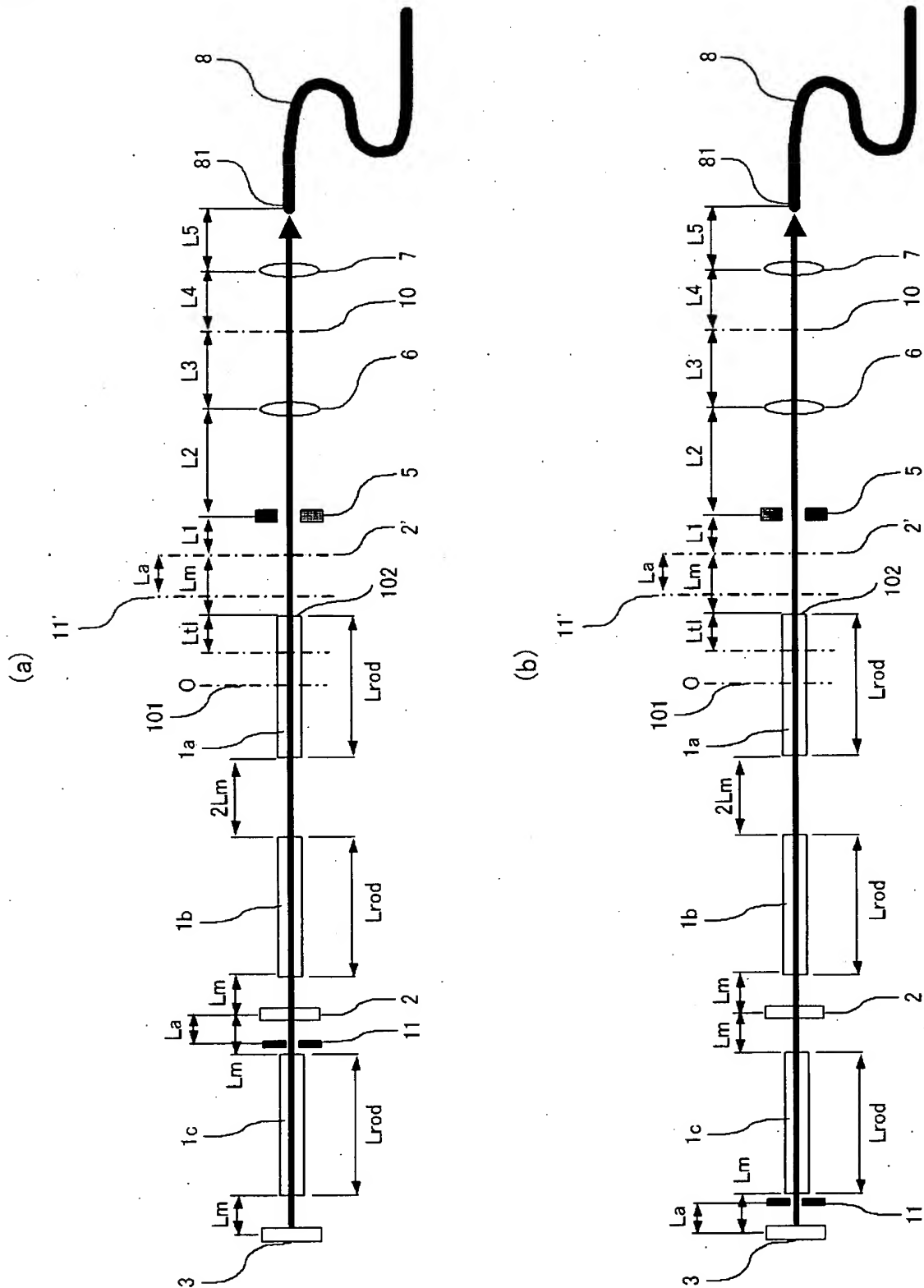
[図11]







[図14]



[図15]

